



УКРАЇНА

(19) UA (11) 62606 (13) U
(51) МПК
G06G 7/60 (2006.01)ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИОПИС
ДО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ПРИСТРІЙ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДВОСПРЯМОВАНОЇ АСОЦІАТИВНОЇ ПАМ'ЯТІ

1

2

(21) u201015230

(22) 17.12.2010

(24) 12.09.2011

(46) 12.09.2011, Бюл.№ 17, 2011 р.

(72) ДМИТРИЄНКО ВАЛЕРІЙ ДМИТРИЙОВИЧ, ЗАКОВОРОТНИЙ ОЛЕКСАНДР ЮРІЙОВИЧ, БЕЛЄВЦОВ ІГОР ОЛЕГОВИЧ

(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

(57) Пристрій безперервної двоспрямованої асоціативної пам'яті, який створений на основі нейронних мереж адаптивної резонансної теорії (АРТ), складається із сенсорного шару нейронів, проміжного шару нейронів, елементи якого зв'язані парами бінарних двоспрямованих зважених зв'язків з усіма елементами шарів спільних вирішальних нейронів двох модулів, до складу першого з яких входять два паралельно працюючі підмодуля, зв'язані один з одним односпрямованими зв'язками, і являють собою модифіковані безперервні нейронні мережі АРТ-2, кожна з яких включає в собі шар інтерфейсних елементів, нейрони якого пов'язані з відповідними їм елементами сенсорного шару нейронів модуля парами двоспрямованих зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами, шар розпізнавальних елементів, нейрони якого зв'язані бінарними односпрямованими зв'язками з відповідними їм розпізнавальними нейронами іншого підмодуля нейронної мережі, з кожним з елементів інтерфейсного шару підмодуля парами двоспрямованих зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами, вирішальний нейрон, що зв'язаний збудливими й гальмуючими бінарними односпрямованими зв'язками з усіма елементами інтерфейсного й розпізнавального шарів підмодуля нейронної мережі й загальним вирішальним нейроном модуля, що, у свою чергу, зв'язаний бінарними односпрямованими вихідними зв'язками з усіма елементами загального розпізнавального шару нейронів модуля, а також нормуючий нейрон, що зв'язаний безперервними односпрямованими вихідними зв'язками з усіма елементами інтерфейсного шару нейронів підмодуля безперервної нейронної мережі й безперервними

односпрямованими вхідними зв'язками з усіма елементами сенсорного шару нейронів, який **відрізняється** тим, що до його складу уведений модуль, що являє собою базову архітектуру безперервної нейронної мережі АРТ-2, що, у свою чергу, містить у собі шар сенсорних елементів, нейрони якого зв'язані парами двоспрямованих зв'язків з відповідними їм нейронами інтерфейсного шару, елементи якого зв'язані бінарними односпрямованими вхідними зв'язками з першим нормалізуючим модулем і відповідними їм нейронами першого обробного шару, елементи якого, у свою чергу, зв'язані бінарними односпрямованими вхідними зв'язками з першим нормалізуючим модулем та бінарними односпрямованими вихідними зв'язками з відповідними їм нейронами другого обробного шару, які, у свою чергу, зв'язані бінарними односпрямованими вихідними зв'язками з другим нормалізуючим модулем і відповідними їм нейронами четвертого обробного шару, елементи якого зв'язані бінарними односпрямованими вихідними зв'язками з відповідними їм нейронами інтерфейсного та керуючого шарів, а також бінарними односпрямованими вхідними зв'язками з другим нормалізуючим модулем, і парами двоспрямованих зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами з нейронами проміжного шару, при цьому кожний з нейронів керуючого шару зв'язаний бінарними односпрямованими вихідними зв'язками з керуючим нейроном, що, у свою чергу, зв'язаний бінарними односпрямованими вихідними зв'язками з кожним з нейронів розпізнавального шару, елементи якого зв'язані двоспрямованими зваженими зв'язками з безперервними ваговими коефіцієнтами з кожним з нейронів проміжного шару, відповідні елементи якого зв'язані бінарними односпрямованими вихідними зв'язками з відповідними їм нейронами керуючого шару елементів, третім нормалізуючим модулем, а також з відповідними їм нейронами третього обробного шару, елементи якого зв'язані бінарними односпрямованими вхідними зв'язками з третім нормалізуючим модулем, а також бінарними вихідними односпрямованими зв'язками з відповідними їм нейронами другого обробного шару.

(13) U

(11) 62606

(19) UA

Корисна модель належить до обчислювальної техніки, зокрема, до області побудови інтелектуальних автоматизованих систем підтримки прийняття рішень, а саме до напрямку створення баз знань систем підтримки прийняття рішень.

Корисна модель може бути використана при побудові системи підтримки прийняття рішень машиністом такого складного технічного об'єкта, як дизель-поїзд із тяговим асинхронним електроприводом.

Відомий пристрій двоспрямованої асоціативної пам'яті, створеної на основі дискретних нейронних мереж адаптивної резонансної теорії (АРТ), складається із двох сенсорних шарів нейронів і відрізняється тим, що в нього введений проміжний шар нейронів, елементи якого зв'язані парами двоспрямованих зважених зв'язків з відповідними їм елементами розпізнавальних шарів двох однотипних паралельно працюючих модулів, кожен з яких являє собою дискретну нейронну мережу адаптивної резонансної теорії, що містить у собі шари інтерфейсних елементів, нейрони яких пов'язані з відповідними їм елементами сенсорних шарів парами бінарних двоспрямованих зв'язків, шари розпізнавальних елементів, нейрони яких пов'язані з кожним з елементів у відповідних їм інтерфейсних шарах парами двоспрямованих зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами, вирішальні нейрони, які зв'язані збудливими й гальмуючими зв'язками з усіма елементами сенсорних, інтерфейсних і розпізнавальних шарів, і керуючі нейрони, які зв'язані збудливими й гальмуючими зв'язками з усіма елементами сенсорних, інтерфейсних і розпізнавальних шарів, а також з відповідними керуючими нейронами, які, у свою чергу, зв'язані з усіма нейронами в проміжному шарі елементів нейронної мережі [1].

Недоліками відомого пристрою є відсутність можливості запам'ятовування й відновлення зі своєї пам'яті асоціативних зображень, які представлені у вигляді векторів з безперервними складовими.

Відомий пристрій двоспрямованої аналого-дискретної асоціативної пам'яті, створений на основі нейронних мереж адаптивної резонансної теорії, що складається із двох сенсорних шарів нейронів, проміжного шару нейронів, елементи якого зв'язані парами бінарних двоспрямованих зважених зв'язків з усіма елементами спільних вирішальних нейронів одного модуля й з усіма елементами розпізнавального шару іншого модуля, що являє собою дискретну нейронну мережу АРТ-1 і містить у собі шар інтерфейсних елементів, нейрони якого пов'язані з відповідними їм елементами сенсорного шару модуля парами двоспрямованих зважених зв'язків з бінарними ваговими коефіцієнтами, шар розпізнавальних елементів, нейрони якого пов'язані з кожним з елементів в інтерфейсному шарі парами двоспрямованих зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами, вирішальний нейрон, що зв'язаний збуд-

ливими й гальмуючими зв'язками з усіма елементами сенсорного, інтерфейсного й розпізнавального шарів і два керуючі нейрони, один із яких зв'язаний збудливими й гальмуючими зв'язками з усіма елементами сенсорного, інтерфейсного й розпізнавальних шарів, а інший - зв'язаний збудливими й гальмуючими зв'язками з усіма елементами сенсорного й розпізнавального шару нейронів, а також з керуючим нейроном усього модуля, що, в свою чергу, зв'язаний вхідними зв'язками з усіма нейронами в проміжному шарі елементів нейронної мережі, і відрізняється тим, що в нього уведено два однотипних паралельно працюючих підмодуля, розпізнавальні нейрони яких пов'язані один з одним бінарними односпрямованими зв'язками, і являють собою модифіковані безперервні нейронні мережі АРТ-2, кожна з яких включає у себе шар інтерфейсних елементів, нейрони якого пов'язані з відповідними їм елементами сенсорного шару нейронів модуля парами двоспрямованих зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами, шар розпізнавальних елементів, нейрони якого зв'язані бінарними односпрямованими зв'язками з відповідними їм розпізнавальними нейронами іншого підмодуля нейронної мережі, з кожним з елементів інтерфейсного шару підмодуля парами двоспрямованих зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами й з відповідними їм спільними розпізнавальними нейронами модуля безперервної нейронної мережі парами двоспрямованих зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами, вирішальний нейрон, що зв'язаний збудливими й гальмуючими бінарними односпрямованими зв'язками з усіма елементами інтерфейсного й розпізнавального шарів підмодуля й спільним вирішальним нейроном модуля, що, у свою чергу, зв'язаний бінарними односпрямованими вихідними зв'язками з усіма елементами спільного розпізнавального шару нейронів модуля нейронної мережі, а також нормуючий нейрон, що зв'язаний безперервними односпрямованими вихідними зв'язками з усіма елементами інтерфейсного шару нейронів підмодуля безперервної нейронної мережі й безперервними односпрямованими вхідними зв'язками з усіма елементами сенсорного шару нейронів паралельно працюючого модуля безперервної нейронної мережі [2].

При порівнянні з першим аналогом, двоспрямована аналого-дискретна асоціативна пам'ять має можливість запам'ятовування в своїй пам'яті зображень, представлених у вигляді векторів з бінарними складовими і ставити їм в асоціацію зображення, представлені у вигляді векторів з безперервними складовими. Однак у розглянутого пристрою відсутня можливість запам'ятовування та відновлення з пам'яті пристрою асоціативних зображень, які представлені тільки у вигляді векторів з безперервними складовими.

Найбільш близьким до заявленого, є пристрій аналогової двоспрямованої асоціативної пам'яті,

створений на основі нейронних мереж адаптивної резонансної теорії, що складається з двох сенсорних шарів нейронів, проміжного шару нейронів, елементи якого пов'язані парами бінарних двоспрямованих зважених зв'язків з усіма елементами шару спільних вирішальних нейронів двох модулів, до складу першого з яких входять два паралельно працюючих підмодуля, пов'язаних один з одним односпрямованими зв'язками, і являють собою модифіковану безперервну нейронну мережу АРТ-2, що включає в себе шар інтерфейсних елементів, нейрони якого пов'язані з відповідними їм елементами сенсорного шару нейронів модуля парами двоспрямованих зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами, шар розпізнавальних елементів, нейрони якого пов'язані бінарними односпрямованими зв'язками з відповідними їм розпізнавальними нейронами іншого підмодуля нейронної мережі, з кожним з елементів інтерфейсного шару підмодуля парами двоспрямованих зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами і з відповідними їм спільними розпізнавальними нейронами модуля безперервної нейронної мережі парами двоспрямованих зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами, вирішальний нейрон, який пов'язаний збудливими і гальмуючими бінарними односпрямованими зв'язками з усіма елементами інтерфейсного і розпізнавального шару підмодуля нейронної мережі і спільним вирішальним нейроном модуля, який, у свою чергу, пов'язаний бінарними односпрямованими вихідними зв'язками з усіма елементами спільного розпізнавального шару нейронів модуля, а також нормуючий нейрон, який пов'язаний безперервними односпрямованими вихідними зв'язками з усіма елементами інтерфейсного шару нейронів підмодуля безперервної нейронної мережі і безперервними односпрямованими вхідними зв'язками з усіма елементами сенсорного шару нейронів, і відрізняється тим, що в нього введені два однотипних паралельно працюючих підмодуля, пов'язаних один з одним бінарними односпрямованими зв'язками, і являють собою модифіковані безперервні нейронні мережі АРТ-2, кожна з яких включає в себе шар інтерфейсних елементів, нейрони якого пов'язані з відповідними їм елементами сенсорного шару нейронів модуля парами двоспрямованих зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами, шар розпізнавальних елементів, нейрони якого пов'язані бінарними односпрямованими зв'язками з відповідними їм розпізнавальними нейронами іншого підмодуля нейронної мережі, з кожним з елементів інтерфейсного шару підмодуля парами двоспрямованих зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами і з відповідними їм спільними розпізнавальними нейронами модуля безперервної нейронної мережі парами двоспрямованих зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами, вирішальний нейрон, який пов'язаний збудливими і гальмуючими бінарними односпрямованими зв'язками з усіма елементами інтерфейсного і розпізнавального шару підмодуля і спільним вирішальним нейроном модуля, який, у свою чергу, пов'язаний бінарними односпрямованими вихід-

ними зв'язками з усіма елементами загального розпізнавального шару нейронів модуля нейронної мережі, а також нормуючий нейрон, який пов'язаний безперервними односпрямованими вихідними зв'язками з усіма елементами інтерфейсного шару нейронів підмодуля безперервної нейронної мережі і безперервними односпрямованими вхідними зв'язками і з усіма елементами сенсорного шару нейронів паралельно працюючого модуля безперервної нейронної мережі [3].

При порівнянні з розглянутими аналогами, пристрій-прототип дозволяє запам'ятовувати і відновлювати зі своєї пам'яті асоціативні зображення, які представлені тільки у вигляді векторів з безперервними складовими.

Однак розглянутий пристрій-прототип не дозволяє зберігати в своїй пам'яті класи процесів, інваріантних до амплітуди вхідних сигналів (зображень).

Таким чином, недоліком пристрою-прототипу є те, що він не дозволяє відносити до одного класу сигнали (процеси), однакові за формою, але різні за амплітудою.

Задача корисної моделі - розробка пристрою безперервної двоспрямованої асоціативної пам'яті, що володіє можливістю запам'ятовування і відновлення зі своєї пам'яті асоціативних процесів (сигналів), які інваріантні до амплітуди вхідних векторів.

Задача вирішується завдяки тому, що пристрій двоспрямованої асоціативної пам'яті змінюється шляхом введення в його структуру модуля, що являє собою базову архітектуру безперервної нейронної мережі АРТ-2, що, у свою чергу, містить у собі шар сенсорних елементів, нейрони якого зв'язані парами двоспрямованих зв'язків з відповідними їм нейронами інтерфейсного шару, елементи якого зв'язані бінарними односпрямованими вихідними зв'язками з першим нормалізуючим модулем і відповідними їм нейронами першого обробного шару, елементи якого, у свою чергу, зв'язані бінарними односпрямованими вхідними зв'язками з першим нормалізуючим модулем та бінарними односпрямованими вихідними зв'язками з відповідними їм нейронами другого обробного шару, які, у свою чергу, зв'язані бінарними односпрямованими вихідними зв'язками з другим нормалізуючим модулем і відповідними їм нейронами четвертого обробного шару, елементи якого зв'язані бінарними односпрямованими вихідними зв'язками з відповідними їм нейронами інтерфейсного та керуючого шарів, а також бінарними односпрямованими вхідними зв'язками з другим нормалізуючим модулем, і парами двоспрямованих зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами з нейронами проміжного шару, при цьому кожний з нейронів керуючого шару зв'язаний бінарними односпрямованими вихідними зв'язками з керуючим нейроном, що, у свою чергу, зв'язаний бінарними односпрямованими вихідними зв'язками з кожним з нейронів розпізнавального шару, елементи якого зв'язані двоспрямованими зваженими зв'язками з безперервними ваговими коефіцієнтами з кожним з нейронів проміжного шару, відповідні елементи якого зв'язані бінарними односпрямованими вихід-

ними зв'язками з відповідними їм нейронами керуючого шару елементів, третім нормалізуючим модулем, а також з відповідними їм нейронами третього обробного шару, елементи якого зв'язані бінарними односпрямованими вхідними зв'язками з третім нормалізуючим модулем, а також бінарними вихідними односпрямованими зв'язками з відповідними їм нейронами другого обробного шару.

Корисна модель ілюструється кресленням, на якому наведена схема пристрою безперервної двоспрямованої асоціативної пам'яті, розробленої на основі нейронних мереж АРТ-2Д та АРТ-2.

Корисна модель складається із двох паралельно працюючих модулів M_1, M_2 . Модуль M_1 являє собою безперервну нейронну мережу АРТ-2Д, а модуль M_2 - базову архітектуру безперервної нейронної мережі АРТ-2. До складу модулів M_1 і M_2 входять сенсорні шари елементів, відповідно S_1^1 і S_1^2 , ($i=1, \dots, n; l=1, \dots, k$), які приймають пари асоціативних вхідних зображень $(S_1^1, S_1^2), (S_2^1, S_2^2), \dots, (S_q^1, S_q^2)$. Елементи сенсорних S -шарів модулів M_1 і M_2 передають вхідні зображення інтерфейсним нейронам Z_1^1, Z_1^2 і Z_1^3 , ($i=1, \dots, n; l=1, \dots, k$), відповідно підмодулів M_{11}, M_{12} і модуля M_2 нейронної мережі. Поряд із встановленням значень нейронів інтерфейсних Z -шарів підмодулів M_{11}, M_{12} і модуля M_2 іде також активізація вирішальних R^1 і R^2 нейронів модулів M_1 і M_2 нейронної мережі.

У підмодулях M_{11} і M_{12} нейронної мережі елементи інтерфейсних шарів Z_1^1, Z_1^2 , ($i=1, \dots, n$) пов'язані з елементами розпізнавальних шарів Y_j^1, Y_j^2 , ($j=1, \dots, m$). З'єднання між елементами інтерфейсних і розпізнавальних шарів здійснюється зваженими зв'язками з ваговими $b_{ij}^1, t_{ji}^1, b_{ij}^2, t_{ji}^2$, ($i=1, \dots, n; j=1, \dots, m$) коефіцієнтами, відповідно для M_{11}, M_{12} підмодулів нейронної мережі. У підмодулях M_{11}, M_{12} і модулі M_2 шари Y_j^1, Y_j^2 і Y_g^3 , ($j=1, \dots, m; g=1, \dots, m$) є шарами нейронів, які змагаються, у яких кожний елемент може перебувати в одному із трьох станів: активному, неактивному, загальмованому. У результаті розпізнавання вхідних зображень у кожному модулі нейронної мережі залишається активним тільки один нейрон розпізнавального шару Y_j^1, Y_j^2 і Y_g^3 у відповідних ним шарах Y_j^1, Y_j^2 і Y_g^3 , ($j=1, \dots, m; g=1, \dots, m$) підмодулів M_{11}, M_{12} і модуля M_2 нейронної мережі. За допомогою вирішальних нейронів R_1^1, R_2^1 визначаються відповідні параметри подібності p_1^1, p_1^2 , від-

повідно для підмодулів M_{11}, M_{12} , а за допомогою нейронів R^1 і R^2 визначаються відповідні загальні параметри подібності p^1 й p^2 модулів M_1 і M_2 нейронної мережі.

Модуль M_2 нейронної мережі містить у собі три поля нейронів: поле вхідних обробних нейронів, що складається із шести шарів елементів $Z_l^3, O_l, A_l, B_l, C_l, X_l^2$, ($l=1, \dots, k$) і нормалізуючих модулів G_1, G_2, G_3 , поле розпізнавальних нейронів Y_g^3 , ($g=1, \dots, m$) і поле керуючих нейронів, до яких належать елементи R_2 і R_l^2 , ($l=1, \dots, k$) нейронної мережі. Нейрони Z_l^3 , ($l=1, \dots, k$) модуля M_2 нейронної мережі сприймають вхідні сигнали нейронів S_l^2 , ($l=1, \dots, k$), рівні відповідним сигналам пропонування зображень і підсумовують їх з вихідними сигналами нейронів O_l , ($l=1, \dots, k$). Вихідні сигнали нейронів Z_l^3 , ($l=1, \dots, k$) надходять на входи елементів A_l , ($l=1, \dots, k$) і нормалізуючого модуля G_1 , що обчислює норму $\|Z^3\| = \sqrt{U_{\text{вих}, Z_1^3}^2 + \dots + U_{\text{вих}, Z_k^3}^2}$ вектора вихідних сигналів шару Z_l^3 , ($l=1, \dots, k$). Вхідні сигнали нейронів A_l , ($l=1, \dots, k$) модуля M_2 визначаються за співвідношенням:

$$U_{\text{вих}, A_l} = \frac{U_{\text{вих}, Z_l^3}}{e + \|Z^3\|}, l=1, \dots, k,$$

де e - позитивна константа, що запобігає діленню на нуль у випадках, коли $\|Z^3\| = 0$. При цьому функція активації нейронів Z_l^3 і C_l , ($l=1, \dots, k$) модуля M_2 нейронної мережі, задається співвідношенням:

$$U_{\text{вих}, Z_l^3} = \begin{cases} U_{\text{вих}, Z_l^3}, & \text{якщо } U_{\text{вих}, Z_l^3} \geq \theta, \\ 0, & \text{якщо } U_{\text{вих}, Z_l^3} < \theta, \end{cases}$$

де θ - параметр, що визначає поріг для заглушення шумових сигналів. Якщо величина вхідного сигналу $U_{\text{вих}, Z_l^3}$ менше граничного значення

θ , то він розглядається як шум і заглушується $\left(U_{\text{вих}, Z_l^3} = 0 \text{ і } U_{\text{вих}, Z_l^3} = 0 \right)$.

Аналогічним чином визначається функція активації для нейронів C_l , ($l=1, \dots, k$) модуля M_2 нейронної мережі.

Вихідні сигнали нейронів B_l , ($l=1, \dots, k$) модуля M_2 нейронної мережі визначаються виразом: $U_{\text{вих}, B_l} = U_{\text{вих}, A_l} + b \cdot U_{\text{вих}, C_l}$, ($l=1, \dots, k$), де b - позитивна константа; $U_{\text{вих}, C_l}$, ($l=1, \dots, k$) - вихідні сиг-

нали нейронів C_l , ($l=1, \dots, k$) модуля M_2 . Нейрони O_l , ($l=1, \dots, k$) модуля M_2 , використовуючи відповідно вихідні сигнали нейронів B_l , ($l=1, \dots, k$) і нормалізуючого модуля G_2 , що обчислює норму $\|B\|$ вектора вихідних сигналів шару B_l , ($l=1, \dots, k$) модуля M_2 нейронної мережі, визначають свої вихідні сигнали по співвідношенню:

$$U_{\text{вих.}O_l} = \frac{U_{\text{вих.}B_l}}{e + \|B\|}, l=1, \dots, k.$$

Якщо нейрон-переможець γ_G^3 в γ^3 -шарі модуля M_2 ще не визначений, то вихідні сигнали нейронів O_l , ($l=1, \dots, k$) однозначно визначають вихідні сигнали нейронів X_l^2 і C_l , ($l=1, \dots, k$) модуля M_2 нейронної мережі:

$$U_{\text{вих.}X_l^2} = U_{\text{вих.}O_l}; U_{\text{вих.}C_l} = \frac{U_{\text{вих.}X_l^2}}{e + \|X^2\|}, l=1, \dots, k,$$

де $\|X^2\|$ - норма вектора вихідних сигналів нейронів шару X^2 .

Сталий стан обробних нейронів у полі вхідних обробних нейронів модуля M_2 при початкових нульових вихідних сигналах нейронів O_l, X_l^2 і C_l , ($l=1, \dots, k$) досягається після двох модифікацій вихідних сигналів нейронів цього поля. Після досягнення рівноваги в даному полі нейрони X_l^2 , ($l=1, \dots, k$) посилають свої вихідні сигнали на входи нейронів γ_g^3 , ($g=1, \dots, m$):

$$U_{\text{вих.}\gamma_g^3} = \sum_{l=1}^k V_{lg}^1 U_{\text{вих.}X_l^2}, g=1, \dots, m,$$

де V_{lg}^1 , ($l=1, \dots, k; g=1, \dots, m$) - ваги зв'язків від нейронів X_l^2 , ($l=1, \dots, k$) до нейронів γ_g^3 , ($g=1, \dots, m$).

Серед розпізнавальних нейронів γ_g^3 , ($g=1, \dots, m$) модуля M_2 визначається нейрон-переможець γ_G^3 , що має найбільший вихідний сигнал: $U_{\text{вих.}\gamma_G^3} \geq U_{\text{вих.}\gamma_g^3}$, ($g=1, \dots, m$). Під час ви-

значення нейрона-переможця γ_G^3 вихідні сигнали всіх нейронів поля вхідних обробних нейронів залишаються незмінними доти, поки сигнал з виходу нейрона-переможця не надійде на входи нейронів X_l^2 , ($l=1, \dots, k$). Після цього вихідними сигналами від нейронів X_l^2 і O_l , ($l=1, \dots, k$) визначаються значення вихідних сигналів нейронів R_l^2 , ($l=1, \dots, k$) модуля M_2 нейронної мережі:

$$U_{\text{вих.}O_l} = \frac{U_{\text{вих.}B_l}}{e + \|B\|}, l=1, \dots, k;$$

$$U_{\text{вих.}X_l^2} = U_{\text{вих.}O_l} + V_{Gl}^2 \cdot U_{\text{вих.}\gamma_G^3}, l=1, \dots, k;$$

$$U_{\text{вих.}R_l^2} = \frac{U_{\text{вих.}O_l} + x_l \cdot U_{\text{вих.}X_l^2}}{e + \|O\| + x_l \cdot \|X^2\|}, l=1, \dots, k,$$

де x_l - ваги зв'язків від нейронів X_l^2 , ($l=1, \dots, k$) до нейронів R_l^2 , ($l=1, \dots, k$) модуля M_2 нейронної мережі. Одержавши вихідні сигнали нейронів R_l^2 , ($l=1, \dots, k$) модуля M_2 , елемент R^2 розраховує норму вектора вихідних сигналів R_l^2 , ($l=1, \dots, k$):

$$\|R^2\| = \frac{\|U_{\text{вих.}O_l} + x_l \cdot U_{\text{вих.}X_l^2}\|}{e + \|O\| + x_l \cdot \|X^2\|},$$

і порівнює її з параметром подібності p^2 між вхідним зображенням і зображенням, що зберігається у вагах зв'язків нейрона-переможця γ_G^3 модуля M_2 нейронної мережі. Якщо $\|R^2\| < p^2$, то нейрон γ_G^3 загальмовується ($U_{\text{вих.}\gamma_G^3} = -1$) й надалі не приймає участі в змаганнях при пред'явленні поточного зображення. Якщо $\|R^2\| \geq p^2$, то відбувається навчання ваг зв'язків нейрона-переможця γ_G^3 .

Двоспрямована асоціативна пам'ять, побудована на нейронних мережах АРТ-2Д і АРТ-2, орієнтована на роботу з безперервними вхідними зображеннями, тому всі ваги зв'язків нейронів модулів M_1 і M_2 є безперервними.

Архітектуру нейронної мережі, крім двох модулів на основі нейронних мереж АРТ-2Д і АРТ-2, визначає шар проміжних нейронів P_d , ($d=1, \dots, m$), що зв'язує модулі M_1 й M_2 . На етапі навчання модулі M_1 й M_2 нейронної мережі будуть запам'ятовувати пари асоціативних зображень. При цьому поряд із установленням значень ваг зв'язків усередині кожного з модулів, будуть встановлюватися й матриці вагових коефіцієнтів проміжного шару нейронів P_d , ($d=1, \dots, m$), що зв'язує два модулі нейронної мережі. На основі цих вагових коефіцієнтів буде здійснюватись асоціативний зв'язок між запам'ятованими зображеннями двох модулів. Процес навчання нейронної мережі вважається закінченим, коли по закінченню чергової епохи навчання відсутні зміни вагових коефіцієнтів:

$$b_{ji}^1, b_{ij}^2, V_{lg}^1 \quad i \quad t_{ji}^1, t_{ij}^2, V_{gl}^2,$$

($i=1, \dots, n; j=1, \dots, m; l=1, \dots, k; g=1, \dots, m$), відповідно ваг зв'язків від елементів інтерфейсного шару до

елементів розпізнавального шару і ваг зв'язків від елементів розпізнавального шару до елементів інтерфейсного шару, підмодулів M_{11}, M_{12} і модуля M_2 нейронної мережі.

Матриці ваг зв'язків між елементами розпізнавальних шарів модулів M_1 і M_2 нейронної мережі й елементами проміжного P_d , ($d = 1, \dots, m$) шару на умову навчання не впливають.

У режимі розпізнавання вхідних зображень і визначення їм асоціативних зображень n - або k -мірні вхідні вектори можуть подаватись відповідно на входи S_i^1 або S_l^2 , ($i = 1, \dots, n$; $l = 1, \dots, k$) елементів, відповідно модулів M_1 і M_2 нейронної мережі. При роботі нейронної мережі не передбачається подача зображень на обидва поля вхідних елементів одночасно. Нейрон-переможець X_j^1 модуля M_1 визначається сигналами нейронів-переможців Y_j^1 і Y_j^2 розпізнавальних шарів Y_j^1, Y_j^2 , ($j = 1, \dots, m$), відповідно підмодулів M_{11}, M_{12} нейронної мережі. У свою чергу, нейрон-переможець Y_j^1 вибирається в результаті змагання нейронів розпізнавального шару Y_j^1 , ($j = 1, \dots, m$), підмодуля M_{11} нейронної мережі. Нейрон-переможець Y_j^2 підмодуля M_{12} вибирається не в результаті змагання нейронів розпізнавального шару Y_j^2 , ($j = 1, \dots, m$) підмодуля M_{12} , а сигналом з відповідного нейрона-переможця Y_j^1 підмодуля M_{11} після його перевірки за величиною параметра подібності p_j^1 . У зв'язку з цим уведені зв'язки між парами Y -нейронів Y_j^1, Y_j^2 , ($j = 1, \dots, m$) у модулі M_1 нейронної мережі. Виділений у такий спосіб нейрон Y_j^2 підмодуля M_{12} , також перевіряється по величині параметра подібності p_j^2 . Якщо нейрон Y_j^2 витримує цю перевірку й витримують наступну перевірку за величиною параметра подібності й пари нейронів Y_j^1, Y_j^2 підмодулів M_{11}, M_{12} , то на виході розпізнавального нейрона X_j^1 модуля M_1 з'являється одиничний сигнал, що свідчить про розпізнавання вхідного зображення. Якщо нейрон Y_j^2 або пари елементів Y_j^1, Y_j^2 підмодулів M_{11}, M_{12} не витримують перевірку за величиною параметрів подібності, то нейрон Y_j^1 підмодуля M_{11} загальмовується $\left(U_{\text{вих.}Y_j^1} = -1 \right)$, а нейрон Y_j^2 підмодуля M_{12} переводиться в неактивний стан $\left(U_{\text{вих.}Y_j^2} = 0 \right)$. У свою чергу, нейрон-переможець

Y_g^3 модуля M_2 може визначатись в результаті змагання нейронів розпізнавального шару Y_g^3 , ($g = 1, \dots, m$), при цьому його вектор вагових коефіцієнтів, відповідно до заданого значення параметра подібності, повинен відповідати вхідному зображенню.

Після вибору нейрона-переможця X_j^1 або Y_g^3 одного з модулів M_1 або M_2 , здійснюється вибір нейрона-переможця іншого модуля нейронної мережі. Він визначається не в результаті змагання нейронів розпізнавального шару, а активізується нейроном-переможцем першого модуля, через зв'язки елементів $-P$ - шару. Цей нейрон-переможець за допомогою спадаючих зв'язків відновить в інтерфейсному шарі Z - елементів зображення, що зберігається в його пам'яті. Відновлене зображення повториться на шарі сенсорних елементів і надійде на виходи модуля. Таким чином, відбудеться вибір зображення асоціативного вхідному зображенню, що подається на вхід іншого модуля нейронної мережі.

Пристрій безперервної двоспрямованої асоціативної пам'яті, на основі нейронних мереж АРТ-2Д і АРТ-2, функціонує відповідно до двох алгоритмів: навчання й розпізнавання.

В алгоритмах прийняті наступні позначення:

m - максимальне число пар асоціативних зображень, що запам'ятовуються, і число нейронів у шарах X^1 і Y^3 ;

n і k - число компонентів у вхідному векторі (зображенні) відповідно для модуля M_1 й M_2 ;

p^1 і p^2 - параметри подібності модулів M_1 і M_2 , $0 < p^1, p^2 \leq 1$;

q - число пар асоціативних зображень, що запам'ятовуються;

p_j^1, p_j^2 - параметри подібності між вхідним вектором і векторами, що зберігаються у вагах зв'язків нейронів-переможців, відповідно Y_j^1, Y_j^2 підмодулів M_{11}, M_{12} нейронної мережі; діапазон припустимих значень параметрів подібності: $0 < p_j^1, p_j^2 \leq 1$;

b_{ij}^1, b_{ij}^2 , ($i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, m$) - ваги зв'язків від елементів інтерфейсних шарів Z^1 і Z^2 до елементів розпізнавальних шарів Y^1 і Y^2 відповідно підмодулів M_{11}, M_{12} ; рекомендоване початкове значення при навчанні: $b_{ij}^1 = b_{ij}^2 = 1$, ($i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, m$);

t_{ji}^1, t_{ji}^2 ($j = 1, \dots, m$; $i = 1, \dots, n$) - ваги зв'язків від елементів розпізнавальних шарів Y^1 і Y^2 до елементів інтерфейсних шарів Z^1 і Z^2 , відповідно підмодулів M_{11}, M_{12} ; рекомендоване початкове значення при навчанні: $t_{ji}^1 = t_{ji}^2 = 1$,

$(j = 1, \dots, m; i = 1, \dots, n);$

t_i^3 і b_i^3 , $(i = 1, \dots, k)$ - ваги зв'язків, відповідно від нейронів χ^2 - шару, до нейронів O - шару, і від нейронів O - шару, до нейронів χ^2 - шару модуля M_2 ;

V_{lg}^1, V_{gl}^2 , $(l = 1, \dots, k; g = 1, \dots, m)$ - ваги зв'язків від нейронів χ_l^1 , $(l = 1, \dots, k)$ до елементів розпізнавального шару γ_g^3 , $(g = 1, \dots, m)$ модуля M_2 ;

H_{jd}^1 і Q_{dg}^2 , $(j, d, g = 1, \dots, m)$ - ваги зв'язків від відповідно елементів розпізнавального шару модуля M_1 до елементів проміжного P - шару й від елементів проміжного P - шару до елементів розпізнавального шару модуля M_2 нейронної мережі;

Q_{gd}^1 і H_{dj}^2 , $(g, d, j = 1, \dots, m)$ - ваги зв'язків від відповідно елементів розпізнавального шару модуля M_2 до елементів проміжного P - шару й від елементів проміжного P - шару до елементів розпізнавального шару модуля M_1 нейронної мережі;

$U_{\text{вих.}S_1^1}, U_{\text{вих.}S_1^2}$, $(i = 1, \dots, n; l = 1, \dots, k)$ - вихідні сигнали елементів сенсорних S - шарів, відповідно модулів M_1 і M_2 нейронної мережі;

$U_{\text{вх.}Z_1^p}, U_{\text{вих.}Z_1^p}$ і $U_{\text{вх.}Z_1^3}, U_{\text{вих.}Z_1^3}$, $(p = 1, 2; i = 1, \dots, n; l = 1, \dots, k)$ - вхідні й вихідні сигнали елементів інтерфейсних Z - шарів, відповідно підмодулів M_{11}, M_{12} і модуля M_2 нейронної мережі;

$U_{\text{вих.}Y_j^1}, U_{\text{вих.}Y_j^2}$, $(j = 1, \dots, m)$ - вихідні сигнали розпізнавальних елементів, відповідно підмодулів M_{11}, M_{12} нейронної мережі;

$U_{\text{вих.}X_j^1}, U_{\text{вих.}Y_g^3}$, $(j, g = 1, \dots, m)$ - вихідні сигнали розпізнавальних елементів модулів M_1 і M_2 нейронної мережі;

$U_{\text{вих.}O_l}, U_{\text{вих.}A_l}, U_{\text{вих.}B_l}, U_{\text{вих.}C_l}, U_{\text{вих.}R_l}$ - вихідні сигнали нейронів відповідно шарів O, A, B, C, R , $(l = 1, \dots, k)$ і керуючих нейронів R_l^2 , $(l = 1, \dots, k)$ модуля M_2 нейронної мережі;

$(S_1^{u1}, S_1^{u2}), (S_2^{u1}, S_2^{u2}), \dots, (S_q^{u1}, S_q^{u2})$ - пари асоціативних зображень, що належать до навчальної множини $M^u = \{M_1^u, M_2^u, \dots, M_L^u\}$;

M_h^u , $(h = 1, \dots, L)$ - вхідні зображення, що належать до L образів (динамічних режимів), $L \ll q$;

$S_r^{u1} = (S_{r1}^{u1}, \dots, S_{rn}^{u1})$, $S_r^{u2} = (S_{r1}^{u2}, \dots, S_{rk}^{u2})$, $(r = 1, \dots, q)$ - безперервні вхідні вектори r -ї пари асоціативних зображень, відповідно для модулів M_1 і M_2 ;

$\|Y\|$ - норма вектора Y ;

P_d , $(d = 1, \dots, m)$ - нейрони проміжного шару, які зв'язують модулі M_1 й M_2 асоціативний нейронної мережі;

$I_{w \min}^h(t_i), I_{w \max}^h(t_i)$, $(h = 1, \dots, L; w = 1, \dots, K; t_i = 0, 1, 2, \dots)$ - відповідно мінімальне й максимальне значення змінної $I_w(t_i)$ в h -м, $(h = 1, \dots, L)$ режимі функціонування об'єкта у враховуваній множині $\{I_{w1}^h(t_i), I_{w2}^h(t_i), \dots, I_{wM_h}^h(t_i)\}$ навчаючих процесів у моменти часу t_i ;

K - число процесів у динамічному режимі;

Алгоритм навчання двоспрямованої асоціативної пам'яті, побудованої на основі безперервних нейронних мереж АРТ-2Д і АРТ-2, передбачає виконання наступних кроків:

Крок 1. Ініціюються параметри подібності й всі ваги зв'язків асоціативної нейронної мережі.

Крок 2. Задаються нульові вихідні сигнали всіх розпізнавальних елементів підмодулів M_{11}, M_{12} і модуля M_2 нейронної мережі:

$$U_{\text{вих.}Y_j^1} = 0; U_{\text{вих.}Y_j^2} = 0; U_{\text{вих.}X_j^1} = 0; U_{\text{вих.}Y_g^3} = 0; j, g = 1, \dots, m$$

Крок 3. Для кожної навчальної множини M_h^u , $(h = 1, \dots, L)$ вхідних зображень, що належать до одного режиму функціонування об'єкта, виконуються кроки 4 - 22.

Крок 4. Для кожної множини M_h^u , $(h = 1, \dots, L)$ вхідних зображень, що належать до одного режиму функціонування об'єкта, визначається множина верхніх $I_{w \max}^h(t_i)$ і нижніх $I_{w \min}^h(t_i)$ оригінальних для кожного з K процесів:

$$I_{w \max}^h(t_i) = \max(I_{w1}^h(t_i), I_{w2}^h(t_i), \dots, I_{wM_h}^h(t_i)) \quad h = 1, \dots, L; w = 1, \dots, K$$

;

$$t_i = 0, 1, 2, \dots, T = n - 1,$$

$$I_{q \min}^h(t_i) = \min(I_{q1}^h(t_i), I_{q2}^h(t_i), \dots, I_{qM_h}^h(t_i)) \quad h = 1, \dots, L; q = 1, \dots, K$$

;

$$t_i = 0, 1, 2, \dots, T = n - 1.$$

Отриманими оригінальними активізуються нейрони сенсорного шару

$$S_i^1, (i = 1, \dots, n) \text{ модуля } M_1:$$

$$U_{\text{вих.}S_i^1} = S_{ri}^{u1}, i = 1, \dots, n.$$

Нейрони сенсорного шару S_l^2 , $(l = 1, \dots, k)$ модуля M_2 нейронної мережі активізуються безперервним вхідним вектором, що відповідає r -й парі асоціативних зображень:

$$U_{\text{вих.}S_l^2} = S_{rl}^{u2}, l = 1, \dots, k.$$

Крок 5. Для двох вхідних зображень виконуються кроки алгоритму 6-24.

Крок 6. Формуються вхідні сигнали елементів інтерфейсних шарів Z_1^1, Z_1^2 і Z_1^3 ,

($i = 1, \dots, n; l = 1, \dots, k$) підмодулів M_{11}, M_{12} і модуля M_2 нейронної мережі:

$$U_{\text{вх.}Z_1^p} = U_{\text{вих.}S_1^1}; U_{\text{вх.}Z_1^3} = U_{\text{вих.}S_1^2}; p = 1, 2; i = 1, \dots, n; l = 1, \dots, k$$

Крок 7. Формуються вихідні сигнали елементів інтерфейсних шарів Z_1^1, Z_1^2 і Z_1^3 , ($i = 1, \dots, n; l = 1, \dots, k$) підмодулів M_{11}, M_{12} і модуля M_2 асоціативної нейронної мережі.

Для підмодулів M_{11}, M_{12} :

$$U_{\text{вих.}Z_1^p} = U_{\text{вх.}Z_1^p}; p = 1, 2; i = 1, \dots, n.$$

Для модуля M_2 :

$$U_{\text{вих.}Z_1^3} = U_{\text{вх.}Z_1^3} + a \cdot U_{\text{вих.}O_1}, l = 1, \dots, k,$$

де a - ваговий коефіцієнт.

Крок 8. Вихідні сигнали нейронів Z_1^3 , ($l = 1, \dots, k$) модуля M_2 надходять на вхід нормалізуючого модуля G_1 , що обчислює норму вектора вихідних сигналів $U_{\text{вих.}Z_1^3}$, ($l = 1, \dots, k$):

$$\|Z^3\| = \sqrt{U_{\text{вих.}Z_1^3}^2 + \dots + U_{\text{вих.}Z_k^3}^2}.$$

Крок 9. Вихідні сигнали елементів інтерфейсного шару Z_1^3 , ($l = 1, \dots, k$) надходять на відповідні входи нейронів A_1 , ($l = 1, \dots, k$) модуля M_2 нейронної мережі, вхідні сигнали яких визначаються за виразом:

$$U_{\text{вх.}A_1} = \frac{U_{\text{вих.}Z_1^3}}{e + \|Z^3\|}, l = 1, \dots, k,$$

де e - позитивна константа, що запобігає діленню на нуль у випадках, коли $\|Z^3\| = 0$.

Крок 10. Визначаються вихідні сигнали нейронів B_1 , ($l = 1, \dots, k$) модуля M_2 нейронної мережі:

$$U_{\text{вих.}B_1} = U_{\text{вих.}A_1} + b \cdot U_{\text{вих.}C_1}, (l = 1, \dots, k),$$

де b - позитивна константа.

Крок 11. Вихідні сигнали нейронів B_1 , ($l = 1, \dots, k$) модуля M_2 надходять на входи нормалізуючого модуля G_2 , що обчислює норму вектора вихідних сигналів $U_{\text{вих.}B_1}$, ($l = 1, \dots, k$):

$$\|B\| = \sqrt{U_{\text{вих.}B_1}^2 + \dots + U_{\text{вих.}B_k}^2}.$$

Крок 12. Вихідні сигнали нейронів O_1 , ($l = 1, \dots, k$) модуля M_2 нейронної мережі визначаються по вихідних сигналах нейронів B_1 , ($l = 1, \dots, k$):

$$U_{\text{вих.}O_1} = \frac{U_{\text{вих.}B_1}}{e + \|B\|}, l = 1, \dots, k.$$

Крок 13. Якщо нейрон-переможець в γ^3 -шарі

модуля M_2 ще не визначений, то вихідні сигнали нейронів O_1 , ($l = 1, \dots, k$) однозначно визначають вхідні сигнали нейронів X_1^2 , ($l = 1, \dots, k$) модуля M_2 нейронної мережі:

$$U_{\text{вих.}X_1^2} = U_{\text{вих.}O_1}, l = 1, \dots, k.$$

Крок 14. Вихідні сигнали нейронів X_1^2 , ($l = 1, \dots, k$) модуля M_2 надходять на входи нормалізуючого модуля G_3 , що обчислює норму вектора вихідних сигналів $U_{\text{вих.}X_1^2}$, ($l = 1, \dots, k$):

$$\|X^2\| = \sqrt{U_{\text{вих.}X_1^2}^2 + \dots + U_{\text{вих.}X_k^2}^2}, l = 1, \dots, k.$$

Крок 15. Вихідні сигнали елементів X_1^2 , ($l = 1, \dots, k$) модуля M_2 нейронної мережі визначають вхідні сигнали нейронів C_1 , ($l = 1, \dots, k$) модуля M_2 :

$$U_{\text{вих.}C_1} = \frac{U_{\text{вих.}X_1^2}}{e + \|X^2\|}, l = 1, \dots, k.$$

Крок 16. Нейрони X_1^2 , ($l = 1, \dots, k$) посилають свої вихідні сигнали на входи нейронів γ_g^3 , ($g = 1, \dots, m$):

$$U_{\text{вих.}\gamma_g^3} = \sum_{l=1}^k v_{lg}^1 U_{\text{вих.}X_1^2}, g = 1, \dots, m.$$

При цьому для всіх незагальмованих розпізнавальних γ -нейронів підмодулів M_{11}, M_{12} нейронної мережі розраховуються їхні вихідні сигнали:

$$U_{\text{вих.}\gamma_j^k} = \sum_{i=1}^n b_{ij}^k U_{\text{вих.}Z_i^k}, \text{ якщо}$$

$$U_{\text{вих.}\gamma_j^k} \neq -1, k = 1, 2; j = 1, \dots, m.$$

Крок 17. Серед розпізнавальних нейронів γ_g^3 , ($g = 1, \dots, m$) модуля M_2 визначається нейрон-переможець γ_G^3 , що має найбільший вихідний сигнал:

$$U_{\text{вих.}\gamma_G^3} \geq U_{\text{вих.}\gamma_g^3}, g = 1, \dots, m.$$

При цьому в розпізнавальних γ -шарах підмодулів M_{11}, M_{12} визначаються нейрони-переможці, відповідно γ_j^1, γ_j^2 , що задовольняють умові:

$$U_{\text{вих.}\gamma_j^k} \geq U_{\text{вих.}\gamma_j^k}, k = 1, 2; j = 1, \dots, m.$$

Якщо елементів γ_j^1, γ_j^2 і γ_G^3 в розпізнавальних γ -шарах підмодулів M_{11}, M_{12} і модуля M_2 декілька, то вибираються елементи з найменшими індексами. Якщо знайдений нейрон-переможець є загальмованим, то вхідне зображення для даного модуля не може бути запам'ятоване.

Крок 18. Вихідним сигналам нейронів-переможців Y_J^1, Y_J^2, Y_G^3 присвоюються одиничні значення:

$$U_{\text{вих.}Y_J^1} = U_{\text{вих.}Y_J^2} = 1; U_{\text{вих.}Y_G^3} = 1,$$

а всі інші незагальмовані нейрони розпізнавальних шарів підмодулів M_{11}, M_{12} і модуля M_2 переводяться в неактивний стан:

$$U_{\text{вих.}Y_j^1} = U_{\text{вих.}Y_j^2} = 0; j = 1, \dots, m; j \neq J;$$

$$U_{\text{вих.}Y_g^3} = 0; g = 1, \dots, m; g \neq G.$$

Крок 19. Розраховуються вихідні сигнали елементів інтерфейсних шарів Z_i^1, Z_i^2 , ($i = 1, \dots, n$) відповідно підмодулів M_{11}, M_{12} нейронної мережі:

$$U_{\text{вих.}Z_i^1} = U_{\text{вих.}Y_J^1} t_{ji}^1, i = 1, \dots, n,$$

$$U_{\text{вих.}Z_i^2} = U_{\text{вих.}Y_J^2} t_{ji}^2, i = 1, \dots, n.$$

При цьому після визначення нейрона-переможця Y_G^3 в розпізнавальному Y^3 -шарі модуля M_2 , вихідними сигналами від нейронів X_l^2 і O_l , ($l = 1, \dots, k$) визначаються значення вихідних сигналів нейронів R_l^2 , ($l = 1, \dots, k$):

$$U_{\text{вих.}O_l} = \frac{U_{\text{вих.}B_l}}{e + \|B\|}, l = 1, \dots, k;$$

$$U_{\text{вих.}X_l^2} = U_{\text{вих.}O_l} + V_{Gl}^2 \cdot U_{\text{вих.}Y_G^3}, l = 1, \dots, k;$$

$$U_{\text{вих.}R_l^2} = \frac{U_{\text{вих.}O_l} + x_l \cdot U_{\text{вих.}X_l^2}}{e + \|O\| + x_l \cdot \|X\|}, l = 1, \dots, k,$$

де x_l - вага зв'язку від нейрона X_l^2 , ($l = 1, \dots, k$) до нейрона R_l^2 , ($l = 1, \dots, k$) модуля M_2 нейронної мережі.

Крок 20. Вихідні сигнали нейронів R_l^2 , ($l = 1, \dots, k$) модуля M_2 подаються на вхід вирішального нейрона R^2 , що розраховує норму вектора вихідних сигналів R_l^2 , ($l = 1, \dots, k$):

$$\|R^2\| = \frac{\|U_{\text{вих.}O_l} + x_l \cdot U_{\text{вих.}X_l^2}\|}{\|O\| + x_l \cdot \|X\|}.$$

При цьому визначаються також параметри подібності p_1^1, p_2^1 відповідно для підмодулів M_{11}, M_{12} нейронної мережі:

$$p_1^1 = \frac{\|P_1^h(k, t_i)\|}{K(T+1)}, p_2^1 = \frac{\|P_2^h(k, t_i)\|}{K(T+1)},$$

де $P_1^h(k, t_i)$ й $P_2^h(k, t_i)$ - функції, що відповідають h -му динамічному режиму, розпізнаваному по відповідно максимальним $I_{k \max}^h(t_i)$ і мінімальним

$I_{k \min}^h(t_i)$ значенням або, іншими словами, значенням отриманих змінних, що знаходяться у відповідних полях між двома огинальними, і визначаються по співвідношенням:

$$P_1^h(k, t_i) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } I_{k \max}^h(t_i) \geq I_k^h(t_i), k = 1, \dots, K, t_i = 0, 1, \dots, T = n-1, \\ 0, & \text{якщо } I_{k \max}^h(t_i) < I_k^h(t_i), k = 1, \dots, K, t_i = 0, 1, \dots, T = n-1, \end{cases}$$

$$P_2^h(k, t_i) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } I_{k \min}^h(t_i) \leq I_k^h(t_i), k = 1, \dots, K, t_i = 0, 1, \dots, T = n-1, \\ 0, & \text{якщо } I_{k \min}^h(t_i) > I_k^h(t_i), k = 1, \dots, K, t_i = 0, 1, \dots, T = n-1, \end{cases}$$

$\|P_1^h(k, t_i)\|$ і $\|P_2^h(k, t_i)\|$ - норми функцій $P_1^h(k, t_i)$ і

$P_2^h(k, t_i)$, обумовлені співвідношеннями:

$$\|P_1^h(k, t_i)\| = \sum_{k=1}^K \sum_{t_i=0}^T P_1^h(k, t_i), \|P_2^h(k, t_i)\| = \sum_{k=1}^K \sum_{t_i=0}^T P_2^h(k, t_i),$$

де K - число процесів у розпізнаваних режимах функціонування об'єкта.

Крок 21. Елемент R^2 модуля M_2 нейронної мережі виконує порівняння норми вектора вихідних сигналів нейронів R_l^2 , ($l = 1, \dots, k$) з параметром подібності p^2 між вхідним зображенням і зображенням, що зберігається у вагах зв'язків нейрона-переможця Y_G^3 модуля M_2 нейронної мережі.

Якщо $\|R^2\| < p^2$, то нейрон Y_G^3 загальмовується

$\left(U_{\text{вих.}Y_G^3} = -1 \right)$ й не приймає надалі участі в змаганнях при пред'явленні поточного зображення. Якщо $\|R^2\| \geq p^2$, то відбувається навчання ваг зв'язків переміжного нейрона Y_G^3 .

При цьому, по обчислених параметрах подібності p_1^1, p_2^1 перевіряється також правильність вибору нейронів-переможців Y_J^1, Y_J^2 підмодулів

M_{11}, M_{12} нейронної мережі. Якщо $p_1^1 < p^1$, то умова не виконується, елемент Y_J^1 загальмовується:

$U_{\text{вих.}Y_J^1} = -1$; здійснюється перехід до другої частини кроку 17 алгоритму.

Якщо $p_1^1 \geq p^1$, то умова, що підтверджує правильність вибору нейрона-переможця Y_J^1 підмодуля M_{11} , виконується й здійснюється перехід до наступного кроку алгоритму. Аналогічним образом проводиться перевірка правильності вибору нейрона-переможця Y_J^2 у відповідному йому шарі Y_j^2 , ($j = 1, \dots, m$) підмодуля M_{12} нейронної мережі.

Крок 22. Адаптуються ваги зв'язків елементів Y_J^1, Y_J^2, Y_G^3 відповідно для підмодулів M_{11}, M_{12} і модуля M_2 нейронної мережі:

$$b_{ij}^1 = U_{\text{вх.}Z_i^1}, t_{ji}^1 = U_{\text{вх.}Z_i^1}, i = 1, \dots, n;$$

$$b_{ij}^2 = U_{\text{вх.}Z_i^2}, t_{ji}^2 = U_{\text{вх.}Z_i^2}, i = 1, \dots, n;$$

$$V_{lG}^1 = U_{\text{вх.}X_l^2}, V_{Gl}^2 = U_{\text{вх.}X_l^2}, l = 1, \dots, k.$$

Крок 23. Пара нейронів-переможців Y_j^1, Y_j^2 активізує відповідний їм елемент розпізнавального шару X^1 модуля M_1 нейронної мережі.

Крок 24. Перевіряється умова закінчення навчання модуля M_1 і M_2 нейронної мережі, якщо вона не виконується, то навчання триває, у протилежному випадку здійснюється перехід на наступний крок алгоритму з метою визначення ваг зв'язків нейронів Р - шару.

Крок 25. Для кожної пари вхідних зображень (S_r^{u1}, S_r^{u2}) , $(r = 1, \dots, q)$ виконуються кроки 26-29.

Крок 26. Вхідними зображеннями S_r^{u1} і S_r^{u2} , $(r = 1, \dots, q)$, що подаються відповідно на входи модулів M_1 і M_2 нейронної мережі, визначаються нейрони-переможці X_{Jr}^1, Y_{Gr}^3 модулів M_1 і M_2 нейронної мережі.

Крок 27. Визначаються ваги зв'язків між нейроном-переможцем X_{Jr}^1 модуля M_1 , й елементами Р - шару:

$$H_{Jr,Jr}^1 = H_{Jr,Jr}^2 = 1; H_{Jr,d}^1 = H_{Jr,d}^2 = 0, d, j = 1, \dots, m; d \neq Jr; j \neq Jr$$

Крок 28. Визначаються ваги зв'язків між нейроном-переможцем Y_{Gr}^3 модуля M_2 й елементами Р - шару:

$$Q_{Jr,Gr}^2 = Q_{Jr,Gr}^1 = 1; Q_{Gr,d}^2 = Q_{Gr,d}^1 = 0, d, g = 1, \dots, m; d \neq Jr; g \neq Jr$$

Крок 29. Зупин.

Алгоритм роботи у режимі визначення асоціативних зображень пристрою безперервної двоспрямованої асоціативної пам'яті, побудованої на основі безперервних нейронних мереж АРТ-2Д і АРТ-2, передбачає виконання наступних кроків:

Крок 1. Ініціюються параметри подібності нейронної мережі та всі її ваги зв'язків.

Крок 2. На вхід одного з модулів мережі подається вхідне зображення. Припустимо, що вхідне зображення S_r^1 подається на вхід модуля M_1 нейронної мережі. Тоді аналогічним образом, як і в алгоритмі навчання, визначається нейрон-переможець X_{Jr}^1 модуля M_1 нейронної мережі.

Крок 3. Визначається нейрон-переможець Y_{Gr}^3 модуля M_2 нейронної мережі. Він виділяється не в результаті змагання між розпізнавальними елементами модуля M_2 , а одиничним сигналом еле-

мента P_{Jr} , що, у свою чергу, в активний стан переводиться нейроном-переможцем X_{Jr}^1 . При цьому вихідному сигналу нейрона-переможця Y_{Gr}^3 присвоюється одиничне значення: $U_{\text{вих.}Y_{Gr}^3} = 1$, а

всі інші нейрони розпізнавального шару модуля M_2 нейронної мережі переводяться в неактивний стан:

$$U_{\text{вих.}Y_{Gr}^3} = 1, U_{\text{вих.}Y_g^3} = 0; g = 1, \dots, m; g \neq Gr.$$

Крок 4. Розраховуються вихідні сигнали $U_{\text{вих.}X_l^2}, U_{\text{вих.}O_l}, U_{\text{вих.}Z_l^3}$, $(l = 1, \dots, k)$ відповідно елементів шару X_l^2, O_l, Z_l^3 , $(l = 1, \dots, k)$ модуля M_2 нейронної мережі:

$$U_{\text{вих.}X_l^2} = V_{Gl}^2 \cdot U_{\text{вих.}Y_{Gr}^3}; U_{\text{вих.}O_l} = U_{\text{вих.}X_l^2}; U_{\text{вих.}Z_l^3} = U_{\text{вих.}O_l}$$

Крок 5. На основі вихідних сигналів елементів інтерфейсного шару Z_l^3 , $(l = 1, \dots, k)$ модуля M_2 нейронної мережі, формуються вхідні й вихідні сигнали елементів сенсорного шару S_r^2 , $(l = 1, \dots, k)$ модуля M_2 нейронної мережі. Отримане на виході модуля M_2 зображення $S_r^2 = (S_{r1}^2, \dots, S_{rk}^2)$ є асоціацією зображенню $S_r^1 = (S_{r1}^1, \dots, S_{rn}^1)$, $(r = 1, \dots, q)$, що подається на елементи сенсорного шару нейронів модуля M_1 нейронної мережі.

Крок 6. Зупин.

Джерела інформації:

1. Пат. 18624 Україна, МПК G06G 7/00. Пристрій двоспрямованої асоціативної пам'яті / Дмитрієнко В. Д., Заковоротний О. Ю.; заявник та власник патенту Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № у 2006 05460; заявлено 19.05.2006; опубліковано 15.11.2006, Бюл. № 11.

2. Пат. 33321 Україна, МПК G06G 7/00. Пристрій двоспрямованої аналого-дискретної асоціативної пам'яті / Дмитрієнко В. Д., Заковоротний О. Ю., Романов О. Ю.; заявник та власник патенту Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № у 2008 00804; заявлено 23.01.2008; опубліковано 10.06.2008, Бюл. № 11.

3. Пат. 47481 Україна, МПК G06G 7/00. Пристрій аналогової двоспрямованої асоціативної пам'яті / Дмитрієнко В. Д., Заковоротний О. Ю., Романов О. Ю.; заявник та власник патенту Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № у 2009 07222; заявлено 10.07.2009; опубліковано 10.02.2010, Бюл. № 3.

